卒業研究における材料力学

ポリテクカレッジ小山　産業機械科　長野　修
（小山職業能力開発短期大学校）　学生　荒川恭宏・石井利幸・大根田友行

1．はじめに

学生は実践技術者としての技術を身につける。教育訓練カリキュラムの１つに材料力学の講座がある。高校ですでに学んできた者や初めて学ぶ者が一緒に受講している。いずれも１年生のときに学習する。これを補完するために基礎工学実験の１つにひずみゲージを利用した実験がある。軟鋼板の片持はりに荷重をかけ，そのときの軟鋼のひずみの計測実験を行い実学の一体化を図っている。

今回，卒業研究において静荷重だけでなく動荷重についても学生と一緒に実験を行った。

2．静荷重のひずみ

静荷重のひずみとは荷重が静止している状態のひずみのことで，実験は軟鋼に10kgの静荷重をかけ，そのとき軟鋼に生じるひずみの値を測定した。

2.1　実験装置

動歪アンプは日本電気三栄株式会社製のものを１台，電圧計は横河電機株式会社製のものを１台，ブリッジボックスは株式会社共和電業製DB-120を３個，ひずみゲージは株式会社共和電業製TYPE-KFG-5-120-C1-11N30C2を軟鋼１本につき３枚使用した。図１の実験装置を使用して静荷重のひずみの実験を行った。

試験片の製作は，試験片Aで長さ500mm，幅31.8mm，厚さ4.3mmの軟鋼を１本製作した。また，試験片Bについては同じく長さ500mm，幅24.8mm，厚さは4.3mmのものを１本製作した。

その他使用した工具は，はんだごて，はんだ，ドライバ，スケール，おもり５kgを２個使用した。まず軟鋼を500mmに切断機で切断し，軟鋼の片面を80，400，1200の３種類のサンドペーパでみがき，軟鋼の端から10mmの距離をとってけがき中心をとる。その中心にボール盤で直径６mmの穴をあけ，穴の中心から50mmずつ200mmまでけがきを入れる。けがきをした軟鋼にひずみゲージを貼る。３ヵ所にゲージを貼ることにより同じ鋼材から異なった実験値を測定することができ，測定点が多くなり測定精度を高くすることが期待される。

図１　静荷重の実験装置

2.2 実験方法

動歪アンプの使用方法を知るために付属の取扱説明書を読んだが理解できず，教官に教わりながら実験を行うことにした。使用方法については以下のとおりである。

① 電源を入れ動歪アンプの暖気運転を約10分程度行う。その理由は正確な測定値が出せるようにするためである。
② ATT（減衰器ツマミ）と，VAR（感度微調整ツマミ）を右へ回し最大にする。
③ FILTER（フィルタ）を10Hzに合わせる。
④ 負荷をかける（おもり）。
⑤ CAL（校正値設定スイッチ）を設定する。

以上のような使用方法で実験を行った。

実験における部材の取り付けは，まず初めに切断した軟鋼の１つ（試験片Aとして考えることにする）を台の上にのせてクランプすることになる。台が19.2mm幅の板であるので台の下側に鉄の板をクランプし，次に穴の中心から100mmの所のひずみゲージとブリッジボックスの先端から伸ばした２本の線をはんだづけした。

部材を図１のように実験装置に取り付け，次に穴をあけた試験片Aの先端におもりをのせられるようにフックを取り付けた。実験はまずマニュアルを読みながら自分たちの力を合わせて何度か試してみたが，上手にかつスムーズに実験を行うことができなかったので教官に教えていただきながら行った。

まずは長さ500mm，幅31.8mm，厚さ4.3mmの試験片と10kgのおもりを用意し，ひずみゲージまでの長さXが100mmの所をひずみゲージA，ひずみゲージまでの長さXが150mmの所をひずみゲージB，ひずみゲージまでの長さXが200mmの所をひずみゲージCとする。そして試験片を支えるためにゲージAから100mm，つまり穴の中心からゲージまでの長さXの２倍の距離の200mmの所で台にクランプすることにした。同様にしてひずみゲージBも穴の中心から300mm，ひずみゲージCも穴の中心から400mmの所で台にクランプすることにした。また台が倒れて台の上のものが落ちないようにおもりを利用した。また，実験装置の配線を切らないようにブリッジボックスを固定した。

2.3 理論値計算

Zは断面係数である。Zを求める式は，

$$Z=\frac{b\,h^2}{6}\quad(\mathrm{mm})\quad\cdots\cdots(1)$$

で求めることができる。(1)式において，

b：試験片の幅31.8mmおよび24.8mm

h：試験片の厚さ4.3mm

となる。

εはひずみであって，εを求める式は，

$$\varepsilon=\frac{W}{EZ}X\quad\cdots\cdots(2)$$

で求めることができる。(2)式において，

ε：ひずみ

W：荷重（kg）

E：縦弾性係数（$\mathrm{kgf/cm^2}$）

Z：断面係数（mm）

X：ゲージまでの長さ（mm）

となる。

Eは縦弾性係数であって，今回の実験では軟鋼を使用したので2.12×10^6（$\mathrm{kgf/cm^2}$）となる（計算上ではEは2.12×10^4（$\mathrm{kgf/mm^2}$）に変換して行う）。

例として試験片Aの荷重点からゲージまでの長さが100mmのときの計算をしてみる。

b＝31.8mm，h＝4.3mmを(1)式に代入して，

$$Z=\frac{31.8\times4.3^2}{6}=0.098\ (\mathrm{mm})$$

となる。

上式で求めたZとW＝10kg，E＝$2.12\times10^4\,\mathrm{kgf/mm^2}$，$X$＝100mmを(2)式に代入して，

$$\varepsilon=\frac{10\times100}{2.12\times10^4\times0.098}=4.81\times10^{-4}$$

となる。

2.4 実験結果

10kgの荷重において試験片の支持長さが200mmのときには，たわみは目視で確認できなくて，試験片の支持長さが300mm，400mmと長くなると試験片が水平から下の方向に50mm程度たわんでしまっ

表１　試験片Aの実験値と理論値

	X(mm)	Z(mm)	理論値 ($\times 10^{-4}$)	実験値 ($\times 10^{-4}$)
試験片A	100	0.098	4.81	5.50
	150	0.098	7.22	7.80
	200	0.098	9.63	10.40

表２　試験片Bの実験値と理論値

	X(mm)	Z(mm)	理論値 ($\times 10^{-4}$)	実験値 ($\times 10^{-4}$)
試験片B	100	0.098	4.81	5.50
	150	0.098	7.22	7.80

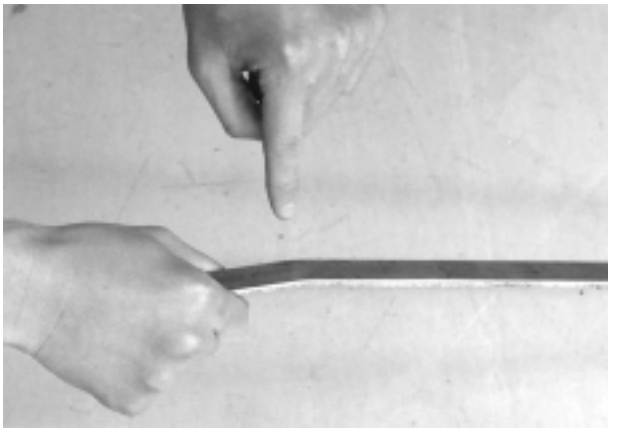

図２　曲がった試験片B

た。しかし，おもりを取り去ると元の形状に戻ったので，弾性限界を超えていないことが理解できた。そのときの試験片Aにおけるεの値を表１に示す。

表１においてXは各ゲージA，B，Cまでの距離となる。試験片Aの実験結果の表１において，断面係数Zはひずみゲージを貼った場所ゲージA，B，Cの３ヵ所においての試験片の幅と厚さを測定し，⑴式にあてはめて計算した。その結果では３ヵ所とも理論値は変わらなかった。

表１におけるεは，実験中に試験片に荷重をかけたとき動歪アンプのVAR（感度微調整ツマミ）を回して電圧計の針を10Vに合わせ，そして荷重をはずしてCAL（校正値設定スイッチ）で電圧計の針を10Vに合わせたときの値となる。

しかし試験片B（長さ500mm，幅24.8mm，厚さ4.3mm）の方で実験をしてみると，10kgのおもりをかけた支持長さが200mmのときですでに水平から30mm程度たわんでいたが，支持長さが300mmのときは60mm程度，400mmのときは100mm程度たわんだ。実験終了後おもりをはずしてみると，試験片Bは図２のように曲がったままで，弾性限界を超えてしまった。

表２は試験片Bにおける実験結果をまとめたものである。

表１，表２の２つの表についていえることは，実験値と理論値のεの値がほぼ理論値に対して実験値が近い値を示していることがわかった。

今回行った実験の実験値と私たちが求めた理論値の２つについて比較してみると，試験片Aについては実験値の動歪アンプのCAL（校正値設定スイッチ）の値の方が理論値よりも３ヵ所とも約1.1倍（実際にはゲージAが1.14倍，Bが1.08倍，Cが1.07倍）程度であり，試験片BではCALの値の方が理論値より，ゲージAでは1.07倍，ゲージBでは1.04倍となった。

またゲージまでの長さXが100mmから200mm，つまり２倍になり，ひずみεも約２倍になったことを考えると，150mmのとき，もし300mmの実験を行ったとすればひずみは２倍となると考えられるのでゲージの長さXとひずみεは比例関係であることが実験により改めて理解された。

３．動荷重のひずみ

動荷重のひずみとは荷重が静止していない状態のひずみのことで，今回の実験は軟鋼にテニスボールを自由落下させ，当たった瞬間の軟鋼に生じるひずみの値を測定した。

3.1　実験装置

動歪アンプは日本電気三栄株式会社製のものを１台，アナライジングレコーダは横河電機株式会社製3655Eを１台使用した。ブリッジボックスは株式会

図３　動荷重の実験装置

社共和電業製DB-120を３個，ひずみゲージは株式会社共和電業製TYPE-KFG-5-120-C1-11L3M2Rを試験片１本につき３枚使用した。

また動荷重のひずみの実験を行うために図３のように実験装置を用意した。

材質は軟鋼を使い，軟鋼は長さ510mm，幅31.9mm，厚さ4.5mmと長さ510mm，幅24.9mm，厚さ4.5mmを１本ずつ用意する。そして用意した軟鋼の片面を80，400，600，800，1000，1200のサンドペーパでみがいた。

また部材の端から10mmの距離にけがき中心を荷重点とし，その荷重点から50mmずつ200mmまでけがき，けがいた100mm，150mm，200mmの所にひずみゲージを貼った。これも静荷重のひずみと同様に荷重点からゲージまでの距離を精度よくするために行った。

試験片にテニスボールを当てたときのひずみの実験を行う前に，従来静荷重のひずみの実験に使っていた机ではボールが試験片に当たったとき机自身振動してしまい，試験片にテニスボールを当てたときのエネルギを吸収して正確な実験値が出ないおそれがあったので，より正確な値を出すために新たに重量の重い実験台を製作することにした。

鋼材は縦300mm，横400mm，高さ100mmで重さがおよそ100kgもあり，作業は慎重に行った。

作業手順は次のとおりである。

① 黒皮をとりサンドペーパで表面をみがく。
② バリを取る。
③ 台の端から200mmの所に中心線をけがく。
④ 中心線から左右30mmの所に線をけがき，また台の端から25mm，117.5mm，210mmの所に線をけがいてセンタポンチを打ちφ6.8のドリルで穴をあける。
⑤ あけた穴にＭ８のタップをたてる。

以上のような手順で図３のような実験台を製作した。

ボール落下ガイドの製作を行った。ガイドなしでテニスボールを試験片に落とすと正確に試験片の荷重点にボールが当たらず，精度よい実験ができなかった。そこでテニスボールが試験片の荷重点に正確に当たるように，パイプを使ってボールを誘導させることにした。

またパイプを立たせると不安定なためパイプに足をつけて安定させるようにした。

作業手順は次のとおりである。

① L字鋼を幅50mmに３枚切断する。
② それらをバリ取りする。
③ L字鋼の片方の端から25mmの所に中心線をけがく。
④ L字鋼の上より12mmの所から下より18mmの所までセンタポンチを打つ。
⑤ センタポンチを打ったところにＭ６のドリルで穴をあける。
⑥ 数個穴をあけたのち，タガネとハンマで穴の内側をくり抜く。
⑦ くり抜いた内側を棒ヤスリでＭ６のねじがスライドできるようにした。これは今回の実験ではテニスボールを高さ１mから落とすことにしたのだが，試験片によって厚さが異なるので，スライドさせることによってその微妙な高さを調節できるようにするためである。
⑧ パイプを1106mmの長さに切断し，切断したパイプの片方の端より20mm，40mmの所にＭ６の穴をあけ，パイプとL字鋼をボルトで１ヵ所につき２本止めしっかりと固定した。

3.2 実験方法

全体の実験の流れとしては静荷重のひずみの実験

とほぼ同じだが，電圧計の代わりにアナライジングレコーダを使用した。静荷重のひずみの場合は，試験片にかかるひずみは静止しているので値は変化しないが，この実験の動荷重のひずみ測定は，試験片にかかるひずみが瞬間的なもので，瞬間の値を読み取ることは難しいので，瞬間の値を表示することのできるアナライジングレコーダを使用することにした。図４は実験風景である。

3.3 実験結果

今回の実験でわかったことは，アナライジングレコーダから取った波形をみて，試験片Aの波の場合，荷重点からゲージまでの長さXが100mmのときは，150mmのときと比べて周期が短くまた振幅も小さくなった。それは試験片Aのゲージまでの長さXが100mmのときはクランプしている長さが短いため，ボールの当たったときの振れが小さいから周期が短く振幅も小さくなったと考えられ，試験片Aのゲージまでの長さXが150mmのときは，ゲージまでの長さXが100mmのときと比べてクランプしている長さXが50mm長く，ボールの当たったときの試験片の振れが多少大きくなっているので，周期が大きく振幅も大きくなったと考えられる。

また試験片Bの波の場合，荷重点からゲージまでの長さが100mmのときは，150mmのときと比べて周期は小さくなったが振幅は大きくなり，周期が小さくなるのは試験片Aのときと同じで，ゲージまでの長さXが100mmのときはクランプしている長さが短いためボールの当たったときの振れが小さいから，周期が小さくなったと考えられる。

また試験片A，Bの振幅を比べてみると，ゲージまでの長さXが150mmのときはほとんど同じだが，ゲージまでの長さXが100mmのときは，試験片Bの方が振幅が大きくなった。これは試験片Bの幅が試験片Aより狭くなったからと考えられる。

表３は試験片Aの実験値をまとめたものである。表４は試験片Bの実験値をまとめたものである。表３，表４の２つの表についていえることは実験値のεの値がゲージまでの長さXが長くなるにつれて小さくなったことである。

私たちは材質として２種類の軟鋼を用意し，試験片を製作して２種類の試験片の実験を行った。実験値から求めたひずみεは，荷重点からゲージまでの長さXが長くなるとひずみεの値は小さくなる。その原因としては，荷重点からクランプした位置までの長さが短い場合，ボールが当たったときのエネルギが分散しにくく，荷重点からクランプした位置までの長さが長い場合は，試験片が曲がりやすいためにボールが当たったときにエネルギが分散してしまうなどの要因が考えられる。

図４　実験風景

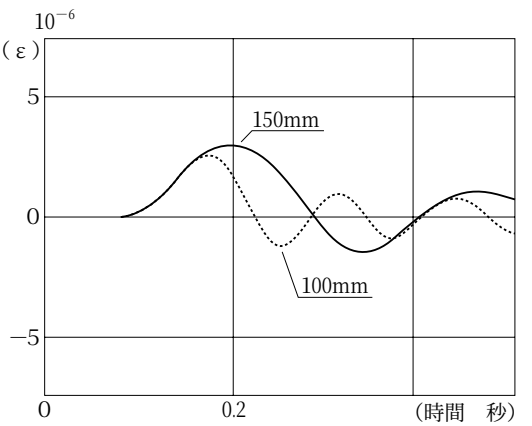

図５　試験片Aの波形

表３　試験片Aの実験値

	X(mm)	Z(mm)	実験値 ($\times 10^{-6}$)
試験片A	100	107.66	3.05
	150	107.66	2.66

表４　試験片Bの実験値

	X(mm)	Z(mm)	実験値 ($\times 10^{-6}$)
試験片B	100	84.04	3.70
	150	84.04	2.94

４．ま と め

静荷重のひずみと動荷重のひずみの比較であるが，静荷重のひずみの実験値は，ゲージまでの長さXが長くなるにつれてひずみεの値は大きくなった。しかし動荷重のひずみは，ゲージまでの長さXが長くなるにつれてひずみεの値は小さくなった。その原因としては，荷重点からクランプした位置までの長さが短い場合ボールが当たったときのエネルギが分散しにくく，荷重点からクランプした位置までの長さが長い場合は，試験片が曲がりやすいためにボールが当たったときにエネルギが分散してしまうなどの要因が考えられる。

卒業研究に取り組んできて，片持はりの軟鋼に静荷重をかけ，そのとき軟鋼にかかるひずみ測定，また片持はりの軟鋼にテニスボールを自由落下させたときのひずみ測定まで進むことができた。結果として静荷重のひずみは，荷重をかけた穴の中心からゲージまでの長さXとひずみの値は，荷重をかけた穴の中心からゲージまでの長さXが長くなった分だけひずみの値は大きくなり比例関係であったが，動荷重のひずみの場合は，静荷重のひずみの場合と逆に荷重をかけた穴の中心からゲージまでの長さXが長くなると，ひずみの値は小さくなってしまった。

最後に本卒業研究にあたりご指導していただいた長野先生，また的確なご指示をくださった諸先生方に心より感謝いたします。

５．卒業研究総括

今回の卒業研究テーマは「実学一体」を実践するためであった。実験装置製作についてはいろいろな障害を乗り越えながらの「ものづくり」を実践することでもあった。

卒業研究初期にはテーマへの関心を高めるために，私自身が相当の時間と労力を費やすことになった。１つ２つと障害を乗り越えるに従って，そのとき感じた感激や知的興奮から学生自身の知的好奇心を目覚めさせることで，終期には多少の指導だけで学生自ら積極的に研究に没頭するようになった。

卒業研究成果については，いろいろな不備があり十分とは言い切れない部分もあるが，学生自身が実学一体としての実践の中で，「生きた能力」を身につけることができた。

１年間の長期間に，学生には教科書に書かれていることがらを実際に行うことの難しさを理解させることができ，その障害を乗り越える創造的応用力を身につけさせることができた。

〈参考文献〉

１）堀野正俊：「機械力学」，理工学社.
２）竹内洋一郎：「わかる材料力学」，日新出版株式会社.
３）実践教育研究会編：「機械工学基礎実験」，株式会社工業調査会.
４）日本機械学会：「機械実用便覧」，日本機械学会.
５）ひずみゲージ接着マニュアル編集委員会：「ひずみゲージ接着マニュアル」，株式会社共和電業.
６）「動ひずみ測定器取扱説明書」，日本電気三栄株式会社.